

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Bilanzgerechte Mittelung
inhomogener Strömungsfelder
Anwendungen
Balance-based averaging of
inhomogeneous flow fields
Applications

VDI 4675
Blatt 2 / Part 2

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt	Seite	Contents	Page
Vorbemerkung	2	Preliminary note.....	2
Einleitung.....	2	Introduction.....	2
1 Anwendungsbereich.....	3	1 Scope.....	3
2 Normative Verweise.....	3	2 Normative references.....	3
3 Formelzeichen, Abkürzungen, Indizes und hochgestellte Symbole	3	3 Symbols, abbreviations, indices, and superscript symbols.....	3
4 Bilanzgerechte Mittelwertbildung.....	6	4 Balance-based averaging.....	6
4.1 Grundlagen.....	6	4.1 Fundamentals.....	6
4.2 Zeitliche Mittelung – Bildung von lokalen Kurzzeitmittelwerten.....	9	4.2 Temporal averaging – Creation of local short-time averages.....	9
4.3 Räumliche Mittelung – Umrechnung gewichteter in bilanzgerechte Mittelwerte.....	13	4.3 Spatial averaging – Conversion of weighted averages into balance-based averages.....	13
5 Anwendungsbeispiele.....	15	5 Example applications.....	15
5.1 Abdampfgehäuse – Homogenisierung.....	15	5.1 Discharge casing – Homogenization.....	15
5.2 Radialverdichter – Kennfeld.....	21	5.2 Radial compressor – Characteristic map.....	21
5.3 Axialturbine – Instationäre Strömung.....	33	5.3 Axial turbine – Unsteady flow.....	33
6 Demonstrationssoftware.....	38	6 Demonstration software.....	38
7 Ausblick und Potenzial.....	42	7 Prospects and potential.....	42
Schrifttum	44	Bibliography.....	44

VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU)
Fachbereich Energietechnik

VDI-Handbuch Energietechnik

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi.de/richtlinien), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter www.vdi.de/4675.

Einleitung

Die Richtlinienreihe VDI 4675 beschreibt Vorgänge, mit denen inhomogene Strömungsfelder mithilfe der konservativen und nicht konservativen Bilanzgleichungen der Strömungsmechanik und Thermodynamik so gemittelt werden, dass dem Mittelungsprozess unterzogene Feldgrößen Werte annehmen, die unter Betrachtung des Gesamtsystems mit allen Prinzipien der physikalischen Bilanzierung verträglich sind. Dabei lässt sich die vorliegende Methode unabhängig von den Geometrien begrenzender Kontrollflächen und -volumina sowohl bei zeitlich als auch bei räumlich inhomogenen Strömungsfeldern anwenden.

In VDI 4675 Blatt 1 wird nach einem historischen Rückblick auf viele Mittelungsverfahren und deren Problematik das sogenannte Verfahren der bilanzgerechten Mittelung vorgestellt. Es unterscheidet zwei Gruppen von Mittelwerten, je nachdem, ob mit den Erhaltungsgesetzen der Strömungsmechanik ein Ausgleich und damit eine Homogenisierung gerechnet wird oder Energieinhalte über eine Integration massengewichteter extensiver kalorischer Zustandsgrößen zusammengefasst werden. Aus den Unterschieden zwischen den beiden vollständigen Sätzen von Mittelwerten können der Grad und die Qualität der Inhomogenität beispielsweise mittels Kennzahlen zum Ausdruck gebracht werden. Blatt 1 beschreibt die rechnerische Vorgehensweise und demonstriert anhand zahlreicher einfacher Beispiele Ergebnisse und Aussagekraft zeitlicher und räumlicher bilanzgerechter Mittelwertbildungen. Im vorliegenden Blatt 2 steht die konkrete Anwendung des Leitfadens zur sinnvollen Mittelung inhomogener Strömungsfelder im Vordergrund.

Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions (www.vdi.de/richtlinien) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards can be accessed on the Internet at www.vdi.de/4675.

Introduction

The VDI 4675 Series of Standards describes methods by which inhomogeneous flow fields can be averaged with the aid of the conservation and non-conservation balance equations of fluid mechanics and of thermodynamics in such a way that the field quantities subjected to the averaging process assume values which are compatible with all principles of physical balancing when the system as a whole is taken into account. The present method can be applied independently of the geometries of bounding control surfaces and volumes not only with temporally but also with spatially inhomogeneous flow fields.

In VDI 4675 Part 1, the method of balance-based averaging is presented after a historical review of many averaging procedures and the problems they raise. It distinguishes between two groups of average values, depending on whether compensation and thus homogenization is expected on the basis of the conservation laws of fluid mechanics, or energy contents are combined by integrating mass-weighted extensive caloric state variables. From the differences between the two complete sets of averages, the degree and quality of inhomogeneity can be expressed, for example, by means of characteristic numbers. Part 1 describes the mathematical procedure and uses numerous simple examples to demonstrate the results and meaningfulness of temporal and spatial balance-based averaging. This Part 2 focuses on the concrete application of the standard for the meaningful averaging of inhomogeneous flow fields.

1 Anwendungsbereich

Zur Darstellung anwendungsorientierter Aspekte der Praxis wird das Verfahren in dieser Richtlinie auf komplexere dreidimensionale und instationäre, z.B. turbulente Strömungsfelder angewendet. Auf der Grundlage der in VDI 4675 Blatt 1 erläuterten Theorie werden einige ausgewählte Fragen im Detail beantwortet, womit die Theorie ergänzt wird. Dazu gehört die Umrechnung statistischer zeitlicher Mittelwerte von turbulenten Strömungen in bilanzgerechte zeitliche Mittelwerte. Dazu gehört ferner die Auswahl von Mittelwerten aus dem alternativen Angebot, um diejenigen Werte zu verwenden, die zu den relevanten Flüssen der jeweiligen Aufgabenstellung, das heißt der Bilanzierung, passen.

Drei Anwendungsbeispiele werden im Detail besprochen und ausgewertet. Es handelt sich um komplexe dreidimensionale Durchströmungen, deren CFD-berechnete bzw. gemessene Strömungsfelder der bilanzgerechten Mittelwertbildung und Analyse unterzogen werden:

- das Abdampfgehäuse einer Niederdruck-Dampfturbine,
- eine Radialverdichterstufe mit Rückführbeschaukelung und
- eine vermessene Axialturbine.

In verschiedenen Querschnitten (den Kontrollebenen) werden Flächenmittelwerte gebildet und eine geeignete Auswahl getroffen, um für eine eindimensionale Darstellung der Durchströmung die mechanischen und thermodynamischen Eigenschaften sinnvoll zu beschreiben. Ferner werden Vergleiche zu herkömmlichen Darstellungen gezogen und die Aussagekraft von Inhomogenitätskennzahlen demonstriert.

Eine Demonstrationssoftware zur Flächenmittelung wird beschrieben und unter www.vdi.de/4675 zur Verfügung gestellt. Einige Hinweise auf das weiterführende Potenzial der bilanzgerechten Mittelwertbildung beschließen die Richtlinie.

2 Normative Verweise

Das folgende zitierte Dokument ist für die Anwendung dieser Richtlinie erforderlich:

VDI 4675 Blatt 1:2012-09 Bilanzgerechte Mittelung inhomogener Strömungsfelder; Einführung

3 Formelzeichen, Abkürzungen, Indizes und hochgestellte Symbole

Formelzeichen

In dieser Richtlinie werden die nachfolgend aufgeführten Formelzeichen verwendet:

1 Scope

For presentation of practical application-oriented aspects, the method is applied in this standard to more complex three-dimensional and unsteady, e.g. turbulent, flow fields. Based on the theory explained in VDI 4675 Part 1, some selected questions are answered in detail, thus supplementing the theory. This includes the conversion of statistical time averages of turbulent flows into balance-compliant time averages. It also includes the selection of averages from the alternative offered in order to use those values that fit the relevant fluxes of the respective task, i.e. balancing.

Three example applications are discussed and evaluated in detail. These are complex three-dimensional flows whose flow fields, calculated by CFD or measured, are subjected to balance-based averaging and analysis:

- the discharge casing of a low-pressure steam turbine,
- a radial compressor stage with return blades, and
- a measured axial turbine.

In different cross-sections (the control planes) area averages are formed and a suitable selection is made to describe the mechanical and thermodynamic properties for a one-dimensional representation of the flow-through. Furthermore, comparisons with conventional representations are drawn and the informative value of inhomogeneity numbers is demonstrated.

Demonstration software for area averaging is described and made available at www.vdi.de/4675. The standard concludes with a few references to the further potential of balance-based averaging.

2 Normative references

The following referenced document is indispensable for the application of this standard:

VDI 4675 Part 1:2012-09 Balance-based averaging of inhomogeneous flow fields; Introduction

3 Symbols, abbreviations, indices, and superscript symbols

Symbols

The following symbols are used throughout this standard: